

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"**

СИДОРЕНКО СЕРГІЙ БОРИСОВИЧ

УДК 537.521, 537.525, 533.9.07, 621.38, 62-408.8

**ІМПУЛЬСНИЙ РОЗРЯД В СХРЕЩЕНИХ ПОЛЯХ ДЛЯ ОТРИМАННЯ
ПОКРИТТІВ З РОЗГАЛУЖЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ**

Спеціальність 05.27.02 – вакуумна, плазмова та квантова електроніка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електронних приладів та систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України, м. Київ

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Кузьмичєв Анатолій Іванович
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
професор кафедри електронних приладів та систем


Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Демчишин Анатолій Васильович
Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України, провідний науковий співробітник

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Чаплинський Роман Юрійович
Інститут ядерних досліджень НАН України

Захист дисертації відбудеться **20 квітня 2021 року о 14:30** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.08 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий "____" березня 2021 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради кандидат технічних наук	 Віталій АРТЮХОВ
---	---

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертаційної роботи

Покриття з розгалуженою (розвинутою) поверхнею мають різноманітні сфери застосування. Такі покриття використовуються для поглинання світла, теплового випромінювання, певної довжини хвилі електромагнітного випромінювання, газів та рідин певного хімічного складу, використовуються в конденсаторах, гетерах, сенсорах, каталізаторах. Унікальні властивості покриттів з розгалуженою поверхнею роблять їх перспективними для застосування.

Залежно від призначення покриття з розвинутою поверхнею отримують різними способами: механічним, хімічним, електрохімічним, нанесенням порошків, обробкою плазмоструйним методом, осадженням у вакуумному середовищі реакційного газу. Останній спосіб має такі переваги:

- чисте середовище з чистими матеріалами, що не дає додаткових центрів корозії і руйнування;
- дрібнодисперсність;
- більш широкий вибір матеріалів для осадження (включаючи важко сумісні);
- прецизійність отримання технологічних параметрів (товщина покриття, рівномірність, склад, повторюваність, морфологія поверхні);
- екологічність.

Спосіб осадження в середовищі реакційного газу для збільшення питомої площі поверхні характеризується низкою труднощів. Наприклад, порошкові покриття у вигляді дисперсних частинок, отриманих у газовому реактивному середовищі, мають погану адгезію та обсипаються.

Для збільшення адгезії доцільно застосовувати іонно-плазмове осадження з іонним асистуванням (бомбардуванням). Раніше його застосовували тільки для суцільних, щільних покриттів у мікроелектроніці, для зміцнення інструментів тощо. Проте особливості отримання покриттів з розгалуженою поверхнею методом імпульсного іонно-плазмового осадження в середовищі реакційного газу вивчено недостатньо. Тому актуальним напрямком є дослідження та вивчення іонно-плазмового осадження з використання імпульсних режимів, а саме:

- дослідження імпульсного розряду, в якому цей процес відбувається;
- дослідження процесів при отриманні покриттів та їх характеристики.

Важливою характерною особливістю процесу нанесення покриття методом іонно-плазмового осадження під час розпилення або випаровування та іонізації речовин є подача напруги зміщення на підкладку при осадженні. Під час згаданих процесів зі зміщенням виникає можливість дугоутворення та, відповідно, аварійних ситуацій, що спричиняє збої в технологічному процесі та позначається на якості покриття. Дугоутворення також впливає на відтворюваність параметрів покриття. Способом запобігання дугоутворенню є перехід до імпульсних режимів.

Окрім запобігання дугоутворенню, застосування імпульсного режиму дозволяє підвищити миттєву потужність іонного впливу при збереженні середнього теплового рівня впливу.

Імпульсні іонно-плазмові технології потребують розробки спеціального обладнання – технологічних імпульсних модуляторів (ТІМ), які будуть забезпечувати стійку роботу, керувати режимами плазмового навантаження, і, відповідно, керовано впливати на структуру та властивості покриттів.

Для ефективного запалювання та підтримання розряду доцільно використовувати схрещені $E \times H$ поля, а найбільш перспективними системами з полями такого типу для отримання покриттів, що розглядаються, є імпульсна магнетронна розпилювальна система (МРС) та система електронно-променевого випаровування з імпульсним індукційним збудженням розряду.

Таким чином, актуальним є дослідження розряду в схрещених $E \times H$ полях в імпульсній формі (його особливостей, розвитку, існування та зникнення), як для розробки ТІМ, так і для визначення можливостей керування властивостями покриттів та впливу на їх відтворюваність.

Оскільки імпульсний режим розряду потрібен для отримання складних за вмістом та структурою покриттів, доцільно використовувати комплексний підхід, який полягає в дослідженні властивостей імпульсного розряду та впливу його параметрів на характеристики покриттів, а також створення апаратури, що забезпечує оптимальну форму імпульсного розряду.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана відповідно до напрямків науково-дослідницької роботи кафедри Електронних приладів та пристроїв КІП ім. Ігоря Сікорського. Робота пов'язана з науково-дослідними темами:

- на підставі угоди між Урядом України і Урядом Республіки Білорусь про науково-технічне співробітництво від 17.02.1992 р., протоколу міжурядової білорусько-української комісії зі співробітництва в галузі науки і технології від 19-20.06.2003 р. та наказу МОН України № 600 "Про фінансування українсько-білоруських проектів в 2003 році": теми "Розробка потужних імпульсних систем розпилення матеріалів на основі магнетронних і дугових систем і прив'язка їх до технологічних процесів з метою одержання нових тонко- і товстошарових покриттів" (ДР № 0103U002207) і "Розробка імпульсних систем і отримання товстошарових покриттів" (ДР № 0103U002208);

- НДР "Розробка та дослідження імпульсного іонно-плазмового методу отримання тонких плівок та покриттів складного вмісту" (ДР № 0195U002865, термін виконання 1995-1996 рр.). "Фізико-топологічне математичне моделювання джерел заряджених та нейтральних частинок" (ДР № 0115U006750 термін виконання 2015-2018 рр.); "Дослідження електродинамічних ефектів у пристроях вакуумної та плазмової електроніки технологічного призначення" (ДР № 0119U103973, термін виконання 2019–2021 рр.).

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є визначення умов отримання покриттів з розгалуженою поверхнею при використанні імпульсного розряду в схрещених полях, визначення параметрів імпульсного розряду в схрещених полях, що впливають на структуру та

характеристики покриття, та розробка електричних імпульсних модуляторів для пристроїв іонно-плазмового осадження покриттів з розгалуженою поверхнею.

Зазначена мета досягається шляхом розв'язання таких наукових задач:

1. Проведення аналізу методів отримання розгалужених поверхонь та вивчення можливостей використання іонно-плазмового осадження з імпульсним розрядом в схрещених полях для нанесення покриттів з розгалуженою поверхнею.
2. Дослідження та аналіз розвитку імпульсного розряду в схрещених полях при осадженні покриттів з розгалуженою поверхнею.
3. Дослідження впливу імпульсного розряду в схрещених полях на структуру та морфологію плівок з розгалуженою поверхнею.
4. Дослідження впливу концентрації O_2 при іонно-плазмовому осадженні Al в умовах імпульсного збудження розряду на структуру осадженого покриття та зміну його питомої ємності.
5. Створення технологічних імпульсних модуляторів та бібліотеки моделей потужних електронно-вакуумних комутуючих елементів для їх проектування; модулятори призначені для живлення магнетронної розпилювальної системи під час імпульсного іонно-плазмового осадження покриттів з розгалуженою поверхнею.

Об'єкт дослідження

- Іонно-плазмовий метод отримання покриттів з розгалуженою поверхнею та їх характеристики.

Предмет дослідження

- Умови отримання покриттів з розгалуженою поверхнею.
- Імпульсні $E \times H$ розряди в постійному магнітному полі та електромагнітному полі індуктора.
- Обладнання для імпульсного іонно-плазмового осадження.
- Принципи побудови імпульсних модуляторів для живлення пристроїв отримання розгалуженої поверхні.

Методи дослідження

У процесі дослідження було використано відомі та апробовані методи експериментальної фізики:

- електронно-променева мікроскопія, рентгенівський дифракційний аналіз, маспектрометричний аналіз.
- електро-хімічний метод визначення питомої площі поверхні конденсаторної фольги;
- дослідження електричних характеристик розряду;
- методи осцилографічних вимірів;
- стандартизовані методи визначення тиску робочого газу за допомогою манометрично-іонізаційних перетворювачів;

- експериментальні дослідження імпульсних джерел живлення та тонкоплівкових покриттів;
- фізико-математичне моделювання процесів.

Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

1. Виявлено екстремальний характер залежності питомої площі розгалуженої поверхні конденсату Al-O від відношення тиску O_2 до швидкості осадження (P_{O_2}/V_k) в імпульсних реакційних процесах осадження алюмінію в середовищі кисню термоіонним осадженням підчас електронно-променевого випаровування і магнетронним розпиленням; питома площа поверхні визначалась через величину питомої ємності конденсату, при цьому екстремальне значення ємності покриття конденсату Al-O сягало 150 мкФ/см^2 , що відповідало $2,1 \text{ Па} \cdot \text{хв/мкм}$, за умов, що питома ємність гладкої алюмінієвої поверхні становила $0,6 \text{ мкФ/см}^2$.
2. Виявлено, що за умов використання імпульсного реакційного термоіонного осадження алюмінію в середовищі кисню, відбувається зміна морфології поверхні плівок конденсату Al-O від відносно великих кристалітів до глобулярної структури з мікро- та нанoeлементами в залежності від зміни параметру P_{O_2}/V_k в межах $3,3 \cdot 10^{-2} - 4,5 \cdot 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{хв./мкм}$; крупноглобулярні структури діаметром до $\sim 2 \text{ мкм}$ з вмістом кисню в конденсаті Al-O $54,7 \text{ ат.}\%$ відповідали конденсатам з максимальною питомою ємністю.
3. Виявлено, що сильноточний імпульсний магнетронний розряд у суміші газів аргону та кисню з середньою щільністю струму в імпульсі $\sim 200 \text{ мА/см}^2$ встановлюється через стадію імпульсного високовольтного слабострумного розряду протяжністю $\sim 30 \text{ мкс}$ або на фоні слабострумного розряду постійного струму з середньою щільністю струмом $0,4 \div 1 \text{ мА/см}^2$, при якому створюється біля катоду шар просторового позитивного заряду з ефективною пасткою для катодних електронів у схрещених полях.
4. Виявлено виникнення коливних процесів у слабострумному магнетронному розряді з періодом коливань у межах $\sim 20 - 80 \text{ мкс}$ при амплітудах пічків струму $\sim 0,3 - 1,6 \text{ А}$ та напрузі $\sim 500 - 650 \text{ В}$ для мішені площею $\sim 200 \text{ см}^2$; значення періодів та амплітуд пов'язані з величинами баластного опору та паразитних ємностей ланцюга живлення магнетронної розпилювальної системи.
5. Показано, що ВЧ-індуктор на частотах $\sim 880 \text{ кГц}$ збуджує в середовищі пари Al плазмовий розряд гібридного типу з рисами E та H розрядів, в якому циркулярний струм індуктора збуджує розряд у вихровому електричному полі (H типу), а різниця потенціалів між витками індуктора – розряд з холодним катодом у схрещених полях з потенціальним електричним полем (тобто E типу), при цьому існування високих напруг між витками може спричиняти дугоутворення на них під час технологічного процесу, але за умов використання імпульсного живлення розряду відбувається їх придушення.
6. Побудова технологічних імпульсних модуляторів для живлення розряду в реакційному газовому середовищі на комутуючих елементах електронно-

променевого типу забезпечує ефективне керування властивостями й структурою покриттів і автоматично обмежує струм заданою величиною в газорозрядному пристрої осадження, що призводить до придушення дуг та захищає обладнання при коротких замиканнях у плазмовому навантаженні.

Практичне значення отриманих результатів

1. Практично продемонстровано вплив імпульсного магнетронного розряду на процес формування покриттів через керування амплітудою та скважністю імпульсів, які подавались з імпульсного модулятора на магнетрон при осадженні покриття, за допомогою зміни теплового режиму падаючого іонного потоку, що в свою чергу дозволяє керувати властивостями покриттів.
2. Досліджено та встановлено, що при термоіонному імпульсному реакційному осадженні Al у вакуумі в середовищі кисню покриття конденсату Al-O мають різну морфологію, яка змінюється залежно від значень параметру P_{O_2}/V_k , від кристалітів до дрібно-глобулярних структур, що мають різні фізико-хімічні властивості та можливий широкий спектр використання.
3. Визначено, що залежність питомої ємності конденсату Al-O від параметру P_{O_2}/V_k має екстремальний характер, а максимальне значення ємності конденсату припадає на 0,1 Па·хв/мкм. Це вказує на можливість вибору оптимальних параметрів процесу осадження покриття з розгалуженою поверхнею.
4. Отримано збільшення питомої ємності поверхні при осадженні конденсату Al-O на алюмінієву конденсаторну фольгу з 0,6 мкФ/см² (гладка поверхня) до близько 150 мкФ/см².
5. Результати, отримані при розробці та дослідженні технології нанесення конденсату Al-O на анодну конденсаторну фольгу, були використані в НДІ "Уконд" ВО "Катіон" (м. Хмельницький) для створення дослідної технології, при якій ємність серійних травлених фольг перевищувалась на 25- 80 % для робочих напруг 10 – 30 В.
6. Створено імпульсні модулятори, що можуть використовуватися, як для живлення МРС, так і для подачі імпульсного зміщення на підкладку при термоіонному осадженні. Схемні рішення цих приладів можуть використовуватись для подальшого розвитку імпульсної техніки технологічного спрямування.
7. Робота МРС в імпульсному режимі дозволила дослідити імпульсний магнетронний розряд та створити часові діаграми, що дозволяє виявити оптимальні критерії з подальшою оптимізацією імпульсних модуляторів та режимів проведення технологічних процесів.
8. Розроблено бібліотеку моделей комутуючих елементів електронно-променевого типу для технологічних імпульсних модуляторів. Її можна використовувати в сучасних схемотехнічних програмах, а також створювати за аналогією моделі нових комутуючих елементів на основі вольт-амперних характеристик.

Результати досліджень були використані в науково-дослідних та конструкторських роботах на підприємстві НДІ "Уконд" ВО "Катіон" (м. Хмельницький) і ДП "Науково-виробничий центр енергозберігаючих конструкцій і технологій "Технолуч" ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України", а також впроваджені в

навчальний процес кафедри електронних приладів та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Особистий внесок здобувача

У списку опублікованих у спеціальних фахових виданнях праць за темою дисертаційної роботи викладено основні наукові результати. Вони були отримані особисто автором або при його безпосередній участі. Публікації [1, 2, 4, 10] написані здобувачем самостійно. У [3] здобувачем проведено моделювання комутуючого елементу та схеми джерела живлення. Здобувач брав участь у створенні та дослідженні джерела живлення. В [5 - 7, 19, 21] здобувач брав участь у розробці імпульсного модулятора для магнетронної розпилювальної системи, проводив осцилографічні дослідження та брав участь в аналізі результатів; у [11] – моделював електронно-вакуумні модулятори та брав участь в їх створенні та дослідженні; у [20] – розробив моделі електронно-вакуумних комутаторів та на їх основі моделював імпульсні модулятори; у [8, 13, 14, 16, 17, 27, 29] – брав участь в обговоренні технології отримання конденсатів з розгалуженою поверхнею, готував зразки, досліджував та обговорював результати; у [22-26] – брав участь в створенні магнетронно-імпульсної системи, осцилографуванні її характеристик, знятті зондових характеристик та аналізі результатів; у [9, 28] – брав участь в обговоренні конструкції та аналізі результатів; у [12] – брав участь у виготовленні пристрою та аналізі результатів; у [15, 18] – провів аналіз імпульсних режимів для іонно-плазмових технологій.

Апробація результатів дисертації

Основні положення роботи викладено та обговорено на 16 науково-технічних конференціях різного рівня:

- International Conference "Modification of Properties of Surface Layers of Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams" (Sumy, 1993, 1996);
- Харківська Вакуумна конференція сумісно з семінаром-нарадою "Системы откачки ускорителей и термоядерных реакторов" (м. Харків, 1993 р.);
- Міжнародна науково-технічна конференція "Проблемы физической и биомедицинской электроники" (Київ, 1995);
- 6 Міжнародний симпозіум "Тонкие пленки в электронике" (м. Херсон, 1995 р.);
- First International Conference «New Leading-Edge Technologies in Machine Building» (Kharkov – Rybachie, 1995, 1996 pp.);
- Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми фізичної та біомедичної електроніки" (м. Київ, 1996 р.);
- International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology» (Minsk, 1997 p.);
- IX конференція з фізики газового розряду (м. Рязань, 1998 р.);
- конференція "Вакуумная наука и техника" (м. Гурзуф, 1998 р.);
- 14th International Symposium on Plasma Chemistry (Prague, 1999 p.);
- 12th Symposium on Application of Plasma Processes (Slovakia, Liptovsky, 1999 p.);
- 4 Czech-Russian Seminar on Project Contact (Czech Republic, Brno, 2000 p.);

- V наукова конференція "Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології" (НАНСИС-2016) (м. Київ, 2016 р.).
- II міжнародна науково-технічна конференція "Smart-технології в енергетиці та електроніці (STEE)" (сmt. Лазурне, Скадовський р., Херсонська обл., Україна, 2017 р.)
- Міжнародна науково-технічна конференція "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи" (м. Київ, 2017 р.).

Публікації

За результатами досліджень опубліковано 29 наукових праць, у тому числі 10 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави, що входять до Європейського Союзу, 2 – у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент на корисну модель, 17 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Брав участь у 4 науково-дослідних роботах.

Структура й обсяг дисертації

Дисертаційна робота викладена на 226 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, 148 переліків посилань на літературні джерела та 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 186 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 62 рисунками та містить 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи. В ньому сформульовано мету та основні задачі дослідження, зазначено об'єкт, предмет досліджень, наукова новизна та практична цінність роботи, зв'язок з науково-дослідними роботами, особистий внесок автора і відомості про апробацію результатів досліджень, вказано кількість публікацій автора, де описані результати, що використовуються в роботі.

Перший розділ базується на огляді та аналізі джерел літератури, присвячених актуальності теми дисертації. Розглянуто різноманітні іонно-плазмові методи нанесення покриттів у вакуумному середовищі, проаналізовано їх недоліки та переваги. Зроблено акцент на імпульсні методи нанесення покриттів при іонно-плазмовому осадженні та на використання технологічних імпульсних модуляторів для живлення генераторів плазми чи подачі напруги зміщення на об'єкт нанесення покриття. Імпульсне іонно-плазмове осадження знімає температурні обмеження при осадженні, використовує щільні потоки іонізованого пару, іони якого прискорюються в напрямку осадження, збільшує на декілька порядків миттєву швидкість осадження. Амплітуда та скважність ТІМ (рис. 1) впливають на іонну складову потоку речовини.

Так, за допомогою зміни амплітуди імпульсу ТІМ підлягають впливу та керуванню наступні параметри плазмового процесу: ступінь іонізації плазми, енергія заряджених частинок, швидкість розширення та об'єм плазми, температурний режим об'єкту нанесення плівки

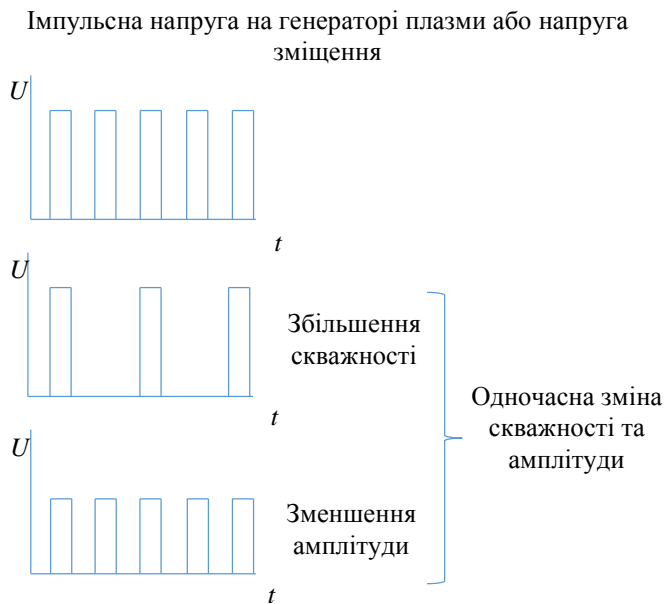


Рис. 1. Принцип керування плазмовим процесом за допомогою імпульсного живлення генератора плазми або напруги зміщення.

конденсаторній фользі. Класичні методи отримання розгалуженої поверхні мають незначне її збільшення, так для механічної обробки 2 - 3,5 до 6 разів, хімічного травлення – 2 – 10, електрохімічного – 15 – 20. Згадані методи вичерпали свої можливості та потребують нових підходів до проблеми збільшення розгалуженої поверхні.

На підставі викладеного в розділі матеріалу обґрунтовано доцільність застосування комплексного підходу до отримання розгалуженої поверхні на анодній конденсаторній фользі, використовуючи вакуумні технології імпульсного реакційного іонно-плазмового осадження зі збудженням розряду в схрещених полях, що дозволить уникнути забруднень на фользі та створить адгезійні покриття з розгалуженою поверхнею.

Другий розділ присвячений методиці проведення експериментів та досліджень. У ньому описуються:

методи та обладнання для дослідження характеристик імпульсного магнетронного розряду;

методи та обладнання для нанесення покриттів при термоіонному осадженні з імпульсним індукційним збудженням розряду;

методи дослідження покриттів з розгалуженою поверхнею, отриманих у розряді зі схрещеними полями.

У **третьому розділі** розглядається розряд в імпульсній магнетронній розпилювальній системі. Джерелом живлення МРС є імпульсний модулятор, який можна виконати на різних комутуючих приладах. Показано доцільність застосування при дослідженні, відпрацюванні та використанні імпульсних іонно-плазмових технологій електронно-променевої комутуючі елементи (КЕ) з ВАХ пентодного типу, які витримують більш довгострокові перевантаження порівняно з

Скважність імпульсів ТІМ впливає на температурний режим магнетрону та температурний режим об'єкту нанесення плівки.

Відповідно перелічені параметри розширюють можливості іонно-плазмового осадження та впливають на властивості покриттів: адгезію, морфологічну структуру покриття, а також температуру мішені магнетрону (для МРС).

Відзначено, що для іонно-плазмових методів нанесення покриттів ефективним є збудження розряду в схрещених полях.

Розглянуто способи отримання розгалужених поверхонь на алюмінієвій

напівпровідниковими КЕ та сприяють дугогасінню. Розроблена бібліотека моделей потужних КЕ та надані в додатках файли моделей, на базі яких можна створити аналогічні моделі комутаторів для ТІМ з подібними характеристиками.

Представлені електричні схеми розроблених джерел живлення потужного технологічного обладнання, в яких при розробці використовувались моделі комутуючих елементів зі створеної бібліотеки.

Надані та проаналізовані експериментальні дані дослідження розряду МРС, що були навантаженням створених імпульсних модуляторів, при цьому піковий струм був до 2 А, питома потужності мішені – до 145 Вт / см² при імпульсній напрузі живленням 2 кВ від модулятора, що працює в режимі джерела струму (рис. 2, 3).

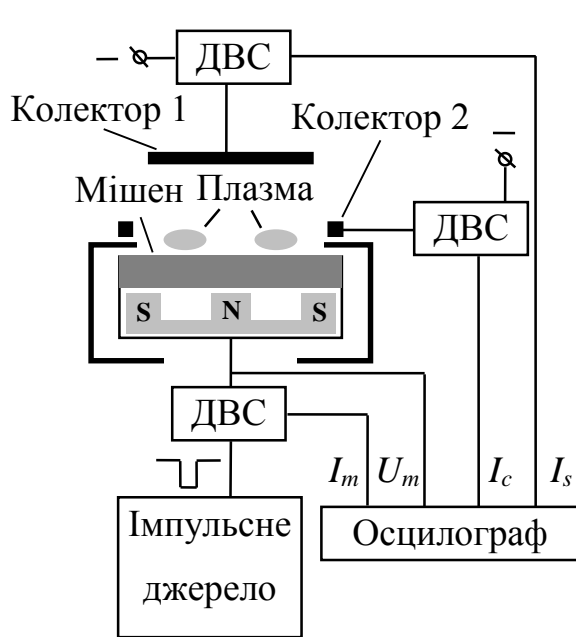


Рис. 2. Схема експериментальної імпульсної магнетронної системи.

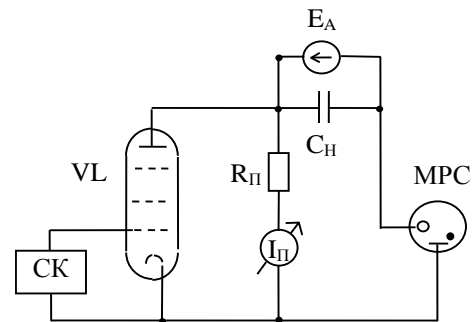


Рис. 3. Модулятор для імпульсного живлення магнетронної системи з підвищеною напругою.

Виявлено та описано коливні процеси, що виникають у МРС при певних тисках у вакуумній камері для режиму слабострумного розряду. Період коливань тривав ~ 20 – 80 мкс, амплітуда напруги та струму на магнетроні знаходилась в межах ~ 500 – 650 В та ~ 0,3 – 1,6 А для мішені ~ 200 см² (рис. 4).

Із досліджень роботи імпульсної МРС отримано спрощені діаграми процесів, що описують динаміку розвитку імпульсного розряду в схрещених полях. Діаграми відображають роботу МРС з підготовчим високовольтним малострумним розрядом та без нього. В розділі описано та проаналізовано передрозрядний період розряду, перехід у сильнострумний режим, квазістаціонарний, післярозрядний періоди (рис. 5).

Розвиток імпульсного магнетронного розряду відбувається в три стадії: перша – підйом напруги на магнетроні до напруги виникнення високовольтного розряду; друга – стадія високовольтного слабострумного розряду; третя – стадія формування, власне, сильнострумного розряду. При використанні в паузах між імпульсами додаткової іонізації того ж порядку, що і при високовольтному розряді, або при роботі на середніх частотах (порядку 10 кГц і вище), розряд з першої стадії, практично минаючи другу, переходить до третьої, і в результаті скорочується та стабілізується час затримки імпульсного сильнострумного магнетронного розряду.

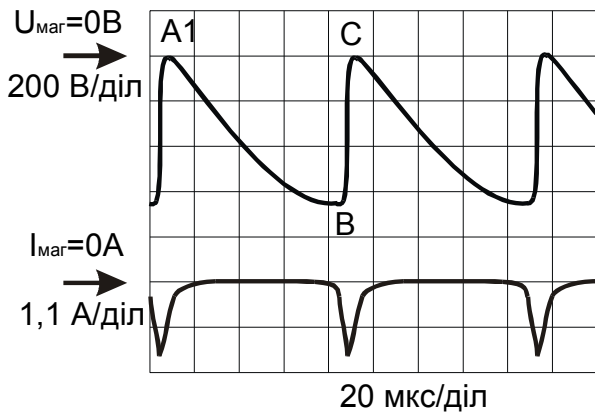


Рис. 4. Типові осцилограми коливальних процесів підготовчого магнетронного розряду при $E=900$ В, $R_C=9,4$ кОм, $P=1,8 \cdot 10^{-3}$ Торр, верхня крива - напруга на магнетроні, нижня – струм.

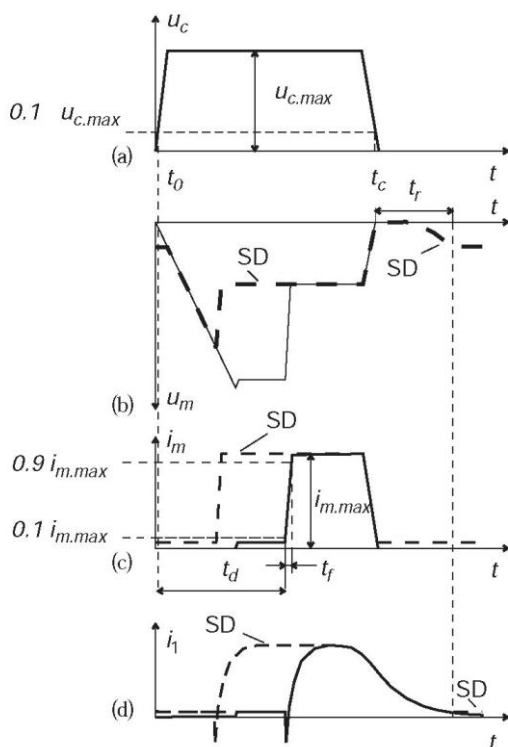


Рис. 5. Спрощені діаграми керуючої імпульсної напруги (u_c), напруги магнетрона (u_m), струму розряду (i_m) і струму колектора 1 (i_1). Штрихові криві показують вплив підготовчого розряду (SD).

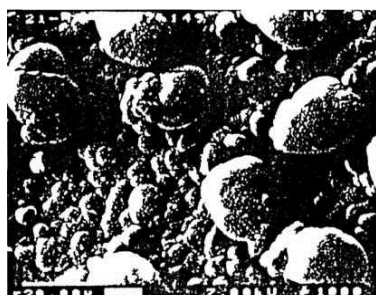
У розділі представлено серію дослідів, що виявляють ефект впливу на склад та морфологію тонких плівок імпульсного режиму роботи МРС порівняно з безперервним. У досліді проводилось розпилення індію в середовищі аргону та суміші аргону й азоту. Розмір нерівностей, визначений з профілограм, був значно більшим для безперервного осадження, ніж для імпульсного, хоч вільного індію в плівках при імпульсному напыленні було більше (рис. 6).

Була встановлена відмінність термічного впливу імпульсного та безперервного режимів магнетронного розпилення вимірюванням температури за допомогою термопари, розташованої на місці підкладки, при цьому на неї подавалась негативна напруга зміщення

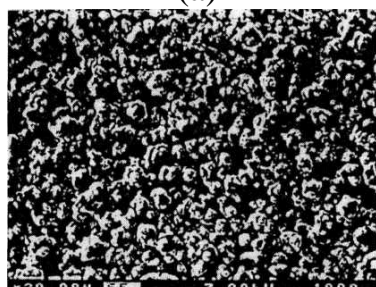
величиною мінус 100 В. Середня потужність, яка виділяється на підкладці за рахунок іонного бомбардування, була приблизно одна і та ж при імпульсному та безперервному осадженні.

Показано, що імпульсне розпилення дозволяє істотно знизити термічний вплив на мішень та підкладку, хоча сама поверхня конденсації в кінці кожного імпульсу може нагріватися до величини, що перевищує температуру підкладки при безперервному осадженні.

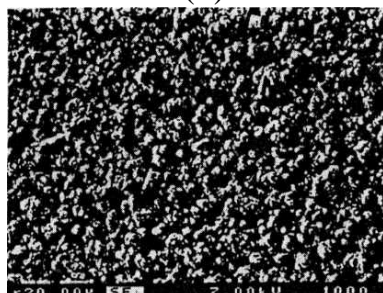
У четвертому розділі розглянуто взаємодію заряджених частинок з електромагнітним полем, збудженим індуктором, живлення якого здійснювалось від генератора ударного збудження, що працює на частоті 880 кГц. Це середньохвильовий діапазон, відповідна довжина хвилі ~ 341 м, при довжині спіралі 3-виткового індуктора $\sim 1,7$ м. Тобто хвильові процеси при такому співвідношенні довжин можна не враховувати, а індуктор можна



(a)



(b)



(c)

Рис. 6. Мікрофотографії плівок InN_x , що отримані при імпульсному та безперервному режимі роботи МРС з протяжностями імпульсів:

- а – безперервне живлення;
- б – 300 мкс; с – 30 мкс.

діаметра – 5 мм його індуктивність буде порядку 1,5 мкГн, активний опір – 0,15 Ом. Для частоти імпульсів генератора 880 кГц, хвильовий опір буде прядку 8,5 Ом. Для переходу до еквівалентної схеми на зосереджених елементах, індуктор розбивається на ланки (кількість ланок вибирається залежно від поставленої задачі та впливає на точність розрахунку і, відповідно, на час розрахунку). Такий підхід пояснює виникнення напруги між витками і, відповідно, виникнення розряду Е-типу.

У п'ятому розділі розглядається використання імпульсного розряду в схрещених полях для створення покриттів з розгалуженою поверхнею, що мають різноманітні галузі застосування, такі як сорбція молекул рідин та газів, світло- та теплопоглинання, і можуть використовуватись в конденсаторах, гетерах, каталізаторах, сенсорах. Описана установка термоіонного реакційного осадження з імпульсним збудженням розряду за допомогою індуктора (рис. 8).

розглядати, як звичайний електрод, який змінює свою полярність відповідно до фази напруги генератора. Витки індуктора розташовувались на відстані ~ 5 мм. При амплітудному значенні напруги на індукторі ~ 900 В між кільцями індуктора виникає напруга ~ 300 В.

Показано, що індуктори, розташовані над тиглем для іонізацій парового потоку, повинні збуджувати не тільки розряд Н-типу в кільцевому електричному полі в середині витків. За рахунок розподіленого по всій довжині індуктору миттєвого потенціалу між витками індуктору існує електричний потенціал достатній для збудження розряду Е-типу. Проте лінії його електричного поля в ближній зоні навколо окремих витків перехрещуються з їх магнітним полем. Таким чином в індукторі виникає розряд гібридного типу, причому лінії електричного поля перетинаються з лініями магнітного поля в складній конфігурації, особливо в просторі поблизу витків.

Для спрощення розуміння та моделювання процесів, які відбуваються в розряді та ланцюгах живлення індуктора запропонована еквівалентна схема індуктора. В ній індуктор представлений, як набір однакових ланок з зосередженими елементами (індуктивностями, ємностями та опорами) (рис 7). При довжині трубки індуктора 1,7 м,

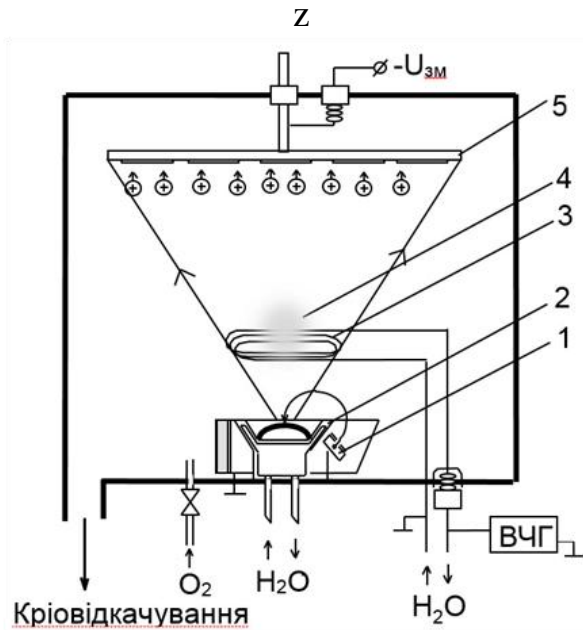


Рис. 7. Схема установки реакційного імпульсного іонного осадження тонких плівок: 1 – електронно-променева гармата; 2 – водоохолоджуваний тигель; 3 – індуктор; 4 – плазма; 5 – підкладкоутримувач зі зразками; ВЧГ – імпульсний або ВЧ генератор для збудження плазми.

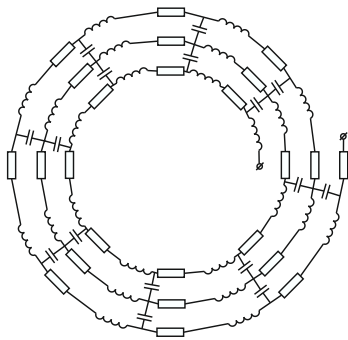


Рис. 8. Еквівалентна схема індуктора.

кисень, можливо, зв'язаний у деякій аморфній фазі.

Максимальна питома ємність C_0 зразків відповідала сірим конденсатам і сягала значень близько 150 мкФ/см^2 , при цьому для гладкої алюмінієвої фольги $C_0 = 0,6 \text{ мкФ/см}^2$, що вимірювалась за аналогічною методикою. В розділі також приводяться дослідження впливу методу напилення та матеріалу покриття на його питому ємність. Покриття, отримані при електронно-променевому випаровуванні в режимі термоіонного осадження та електронно-променевим випаровуванням відрізняються незначно, але при використанні методу термоіонного осадження з імпульсним збудженням розряду мали кращу адгезію конденсату на алюмінієвій

Основним предметом дослідження стали плівки конденсату Al-O з розгалуженою поверхнею. Виявлена залежність зміни морфології структури покриття від відношення тиску кисню у вакуумній камері до швидкості осадження (P_{O_2}/V_k).

Морфології поверхні змінювалась від граненої з відносно великими кристалітами до глобулярної з малими елементами мікроструктури (рис. 9). Конденсати змінювали колір від світлих до сірих та чорних. Було встановлено, що при реакційному імпульсному термоіонному осадженні алюмінію в середовищі кисню спостерігається максимум розгалуженості поверхні при параметрі $P_{\text{O}_2}/V_k \sim 2,1 \cdot 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{хв/мкм}$ (рис. 10).

Дослідження зразків покриттів методом просвічуючої електронної мікроскопії, дифракції електронів, рентгеноструктурного аналізу та рентгенівського емісійного аналізу з електронним збудженням показали наявність у конденсатах тільки однієї кристалічної фази – алюмінію. При збільшенні вмісту кисню в конденсатах інтенсивність рентгенівських ліній зменшується і вони суттєво розширюються. Наявність у деяких зразках великої кількості кисню, порівняного з вмістом останнього в оксиді алюмінію, та відсутність дифракційних ліній оксидної фази свідчать про те, що

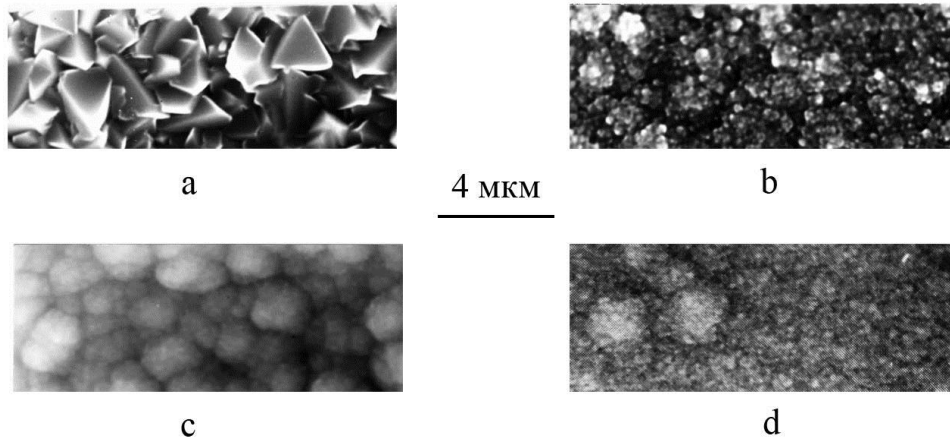


Рис. 9. Мікроструктури поверхонь конденсатів системи Al-O. PO_2/V_k , $Pa \cdot xh/\mu m$: а – $3,3 \cdot 10^{-2}$, б – $9,6 \cdot 10^{-2}$, с – $2,1 \cdot 10^{-1}$, д – $4,5 \cdot 10^{-1}$.²

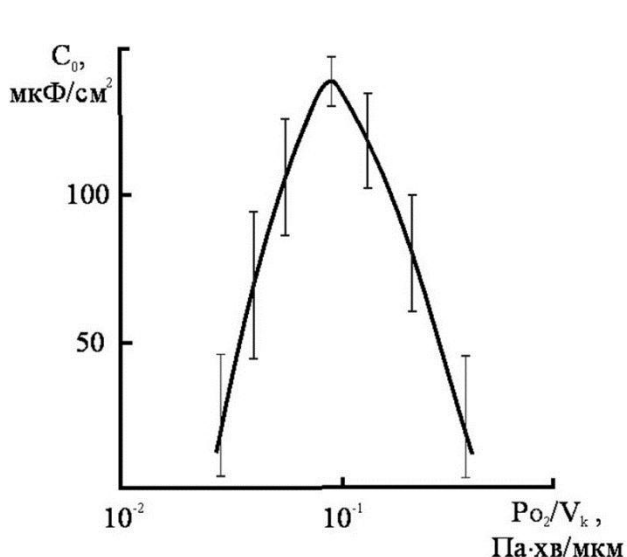


Рис. 10. Залежність питомої ємності зразків C_0 від параметру PO_2/V_k

(розвинутою) поверхнею мають унікальні властивості, вони можуть поглинати випромінювання певної довжини електромагнітної хвилі, сорбувати атоми та молекули певних речовин і відповідно мають широкий спектр застосування в таких приладах, як сенсори, каталізатори, гетери, конденсатори. Дисертаційна робота висвітлює та вирішує ряд науково-технічних задач, пов'язаних з отриманням згаданих покриттів за допомогою імпульсного іонно-плазмового осадження, створенням технологічного обладнання (імпульсних модуляторів) для їх осадження, дослідженням та аналізом процесів, що при цьому відбуваються, та визначає параметри, які впливають на структуру покриття і параметри, які потрібно використовувати при розробці та оптимізації імпульсних модуляторів технологічного призначення.

конденсаторній фользі. Використання магнетронного методу нанесення покриття спричиняє збільшення початкової ємності вдвічі. При нанесенні покриттів з титану та танталу замість алюмінію також спостерігалось збільшення ємності, що пояснюється більшою діелектричною сталою для окислів цих металів порівняно з алюмінієм.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Проведений аналіз науково-технічної інформації дозволив зробити висновок, що покриття з розгалуженою

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. На основі проведеного різностороннього аналізу відомих методів отримання покриттів з розгалуженою поверхнею було встановлено, що для отримання таких покриттів доцільно використовувати метод іонно-плазмового осадження в реакційному середовищі з імпульсним збудженням розряду. Генераторами потоку речовини ефективно використовувати системи зі схрещеними електромагнітними полями такими, як МРС або електронно-променевий випарник з індукційним збудженням розряду, що дозволяють використовувати стандартне вакуумне обладнання для нанесення тонкоплівкових покриттів, при цьому додатково застосовуються імпульсні модулятори для формування імпульсних потоків іонів в напрямку до об'єкту осадження.

2. Встановлено та експериментально доведено, що використання методів імпульсного іонно-плазмового осадження в реакційному середовищі має ряд переваг для осадження покриттів з розгалуженою поверхнею:

- зменшує ймовірність створення аварійних ситуацій, пов'язаних з дугоутворення, і відповідно позитивно впливає на кількість виходу якісних виробів;
- амплітуда та скважність є основними параметрами імпульсного режиму іонно-плазмового осадження, що впливають на адгезію та морфологію покриття, температуру мішені магнетрону та об'єкту нанесення покриття.

3. Розроблено та досліджено процес імпульсного термоіонного осадження алюмінію в реакційному середовищі кисню у вакуумі. Встановлено, що структура плівок змінюється в залежності від відношення тиску кисню у вакуумній камері до швидкості осадження (P_{O_2}/V_k). Зміна параметру P_{O_2}/V_k обумовлює суттєву зміну морфології поверхні: від граненої з відносно великими кристалітами до глобулярної структури з мікро- та нанoeлементами, що спричиняє зміну кольору покриття від світлого до чорного, так при $P_{O_2}/V_k = 3,3 \cdot 10^{-2}$ Па·хв/мкм спостерігаються кристаліти з гранями до ~ 2 мкм з вмістом кисню в конденсаті Al-O 10,0 ат.% та питомою ємністю ~ 10 мкФ/см², при $9,6 \cdot 10^{-2}$ Па·хв/мкм – дрібніші кристаліти з гранями до $\sim 0,4$ мкм з вмістом кисню в конденсаті Al-O 33,9 ат.% та питомою ємністю ~ 100 мкФ/см², при $2,1 \cdot 10^{-1}$ Па·хв/мкм – крупноглобулярні структури діаметром до ~ 2 мкм з вмістом кисню в конденсаті Al-O 54,7 ат.% та питомою ємністю ~ 150 мкФ/см², при $4,5 \cdot 10^{-1}$ Па·хв/мкм – дрібноглобулярні структури діаметром до $\sim 0,4$ мкм з вмістом кисню в конденсаті Al-O 44,8 ат.% та питомою ємністю ~ 15 мкФ/см². Встановлено, що максимум підвищення розгалуженості поверхні спостерігається при $P_{O_2}/V_k \sim 2,1 \cdot 10^{-1}$ Па·хв/мкм. Таким чином, за допомогою параметру P_{O_2}/V_k можна керувати морфологією плівок і відповідно їх властивостями в оптичному діапазоні.

4. Дослідження зразків покриттів методом просвічуючої електронної мікроскопії, дифракції електронів, рентгеноструктурного аналізу та рентгенівського емісійного аналізу з електронним збудженням виявили наявність в конденсатах тільки однієї кристалічної фази – алюмінію. При збільшенні вмісту кисню в конденсатах інтенсивність рентгенівських ліній зменшується і вони суттєво розширюються. Наявність у деяких зразках великої кількості кисню, порівняного з вмістом

останнього в оксиді алюмінію, та відсутність дифракційних ліній оксидної фази свідчать про те, що кисень зв'язаний в деякій аморфній фазі.

5. Встановлено, що конденсати Al – O сірого кольору мали максимальну ємність і, відповідно, підвищену розгалуженість. За умови, коли питома ємність гладкої блискучої алюмінієвої фольги $C_0 = 0,6$ мкФ/см², питома ємність зразків сірого кольору конденсату, виміряна за аналогічною методикою, сягала значень близько 150 мкФ/см². Значне збільшення питомої ємності алюмінієвої конденсаторної фольги дозволило створити в НДІ "Уконд" ВО "Букон" м. Хмельницький дослідну технологію, за якої ємність серійних травлених фольг перевищувалась на 25 – 80 % для робочих напруг 10 – 30 В.

6. При дослідженні впливу методу напилення та матеріалу покриття на параметри анодної конденсаторної фольги було виявлено, що покриття, отримані методами термоіонного осадження та електронно-променевого випаровування, близькі за характеристиками, але при використанні методу термоіонного осадження з імпульсним збудженням плазми отримано адгезійні конденсати на алюмінієвій конденсаторній фользі. Гірші результати отримані при використанні магнетронного методу нанесення покриття, хоч він призводить до збільшення початкової (до формовки) ємності в два рази порівняно з ємністю формованої гладкої фольги та збільшенню на $24 \div 25$ % ємності після формовки порівняно з ємністю формованої гладкої фольги. При нанесенні покриттів з титану та танталу також спостерігалось збільшення ємності, що пояснюється більшою діелектричною сталою для окислів цих металів порівняно з алюмінієм.

7. Створено та досліджено імпульсні модулятори для живлення МРС та подачі імпульсного зміщення на підкладку для імпульсних систем осадження тонкоплівкових покриттів, що дозволило розширити можливості керування технологічними параметрами, які впливають на структури плівок. Використання імпульсних технологій рекомендується при створенні нових типів покриттів, які зможуть бути використані в оптиці, наноелектроніці, машинобудуванні.

8. За допомогою створених імпульсних МРС досліджено особливості імпульсних розрядів в схрещених полях з піковими струмами до 2 А, питомою потужністю мішені до 145 Вт / см² та живленням від 2 кВ вакуумного пентодного модулятора в режимі джерела струму. Встановлено, що існування імпульсного розряду в схрещених полях для розроблених систем складається з трьох стадій його розвитку: перша – підйом напруги на магнетроні до напруги виникнення високовольтного розряду; друга – стадія високовольтного слабострумного розряду; третя – стадія формування сильнострумного розряду. Створено діаграми проходження стадій розвитку розряду в схрещених полях, як з підготовчим розрядом, так і без нього.

Встановлено, що для швидкого переходу до стадії високострумного розряду необхідне накопичення заряджених частинок у міжелектродному проміжку еквівалентних середній щільності струму розряду $0,4 \div 1$ мА/см². Початкова концентрація заряджених частинок для переходу може бути забезпечена або короткотривалим високовольтним слабострумним розрядом, або підготовчим розрядом, або частинками, що залишились після попереднього імпульсу

короткотривалого низьковольтного високострумного розряду. Зі збільшенням тиску газу, частоти імпульсів та амплітуди імпульсів час затримки зменшується.

Збільшення амплітуди струму розряду спричиняє зростання відношення (іонний струм підкладки) / (струм розряду). Тому імпульсний режим розпилення магнетрона може значно покращити енергетичну іонну активацію поверхонь покриттів під час іонно-плазмового осадження.

Проведені дослідження та аналіз фізичних процесів корисні при визначенні робочих параметрів, потрібних при розробці і створенні імпульсних модуляторів, які відповідно впливають на структури покриттів, отриманих за допомогою імпульсної МРС.

9. Виявлено та досліджено коливні процеси слабострумного розряду в схрещених полях, що пов'язані з баластним опором, паразитними ємностями та індуктивностями ланцюгу живлення МРС. Період коливань знаходився в межах $\sim 20 - 80$ мкс при амплітудних значеннях піків струму $\sim 0,3 - 1,6$ А та напруги $\sim 500 - 650$ В для мішені 66×290 мм². У деяких режимах на катоді виникає позитивна напруга до 40 В на період до 10 мкс. Визначено зони для струмів та тисків, де існують коливання. Пояснено механізм виникнення коливань. Рекомендовано не використовувати подібні коливні режими в роботі імпульсної МРС під час технологічних процесів, тому що це може призвести до нестійкого формування сильнострумного розряду.

10. Розглянуто і проаналізовано індукторну систему збудження розряду та встановлено, що в такій системі розряд може бути гібридного типу (Н- та Е-тип одночасно). Циркулярний струм збуджує розряд Н-типу, а різниця потенціалів між витками – тліючий розряд Е-типу. Для пояснення фізичних процесів представлена еквівалентна схема індуктора. При імпульсному збудженні розряду відбувається придушення дугоутворень.

11. Розроблено бібліотеку моделей потужних комутуючих елементів з пентодними характеристиками для програм схемотехнічного моделювання. Моделі створювались на базі довідникових графічних характеристик і можуть бути адаптовані під комутатори з подібними характеристиками. Моделі були апробовані та рекомендуються для моделювання джерел живлення технологічного призначення.

12. Показано, що завдяки ВАХ, електронно-вакуумні комутатори доцільно використовувати в технологічних імпульсних модуляторах у дослідницьких цілях так, як їх можна розглядати, як джерела струму, які стримують розвиток дугоутворення в плазмовому навантаженні та можуть витримувати значні перевантаження по напрузі та струму під час аварійних коротких замикань, а також ефективно керувати властивостями та структурою тонких плівок.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях, у т.ч. статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз.

1. С. Б. Сидоренко, "Выбор ключевых элементов для технологических импульсных модуляторов", *Электроника и связь*, вып. 2, ч. 1, Киев, с. 102 – 105, 1997.
2. С. Б. Сидоренко, "Моделирование высоковольтного источника питания с электронно-вакуумным регулирующим элементом", *Электроника и связь*, вып. 4, ч. 2, Киев, с. 211 – 215, 1998.
3. А. И. Кузьмичев, Ю. В. Мельник, С. Б. Сидоренко, А.В. Беспалько, "Стабилизированный регулируемый источник питания для электронно-лучевого испарителя", *Электроника и связь*, вып. 4, ч. 3, Киев, с. 500 – 504, 1998.
4. С. Б. Сидоренко, "Коливні процеси слабострумного магнетронного розряду в розпилювальній системі", *Електроніка і зв'язь*. № 6, т. 2. Київ, с. 25 – 29, 1999.
5. С. В. Денбновецкий, Р. Хипплер, А. И. Кузьмичев, В. Ю. Куликовский, С. У. Нисимов, С. Б. Сидоренко, "Запаздывание возникновения разряда в импульсных магнетронных распылительных устройствах", *Электроника и связь*. № 8, т. 2. Киев, с. 195 – 198, 2000.
6. А. И. Кузьмичев, В. Ю. Куликовский, С. Б. Сидоренко, "Динамические характеристики импульсной магнетронной распылительной системы", *Известия Академии наук. Сер. Физическая*, т.64, № 7, с. 1317-1321, 2000 (SCOPUS).
7. A. Kuzmichev, S. Sidorenko, H. Steffen, R. Hippler, V. Kulikovsky, "Investigation of a pulsed magnetron sputtering discharge with a vacuum pentode modulator power supply", *Vacuum*, v. 72, n. 1, pp. 59 – 69, 2004. DOI:10.1016/S0042-207X(03)00100-3 (SCOPUS).
8. С. Б. Сидоренко, О. М. Бевза, Я. С. Сидоренко, "Дослідження чинників впливу на одержання розвинутої поверхні конденсату Al–O", *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, т. 15, № 1, с.133–139, 2017 (SCOPUS).
9. О. М. Бевза, С. Б. Сидоренко, А. В. Мумладзе, "Осаждение двухкомпонентного состава, содержащего магнитный материал, при помощи магнетронной распылительной системы", *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, т. 14, № 4, с. 577–589, 2016 (SCOPUS).
10. С. Б. Сидоренко, "Отримання та дослідження конденсату Al-O з розвинутою поверхнею при реакційному іонному осадженні", *Electron Commu*n, v.22, №3, 2017.

Статті в інших виданнях

11. А. И. Кузьмичев, С. Б. Сидоренко, О. Н. Бевза, "Импульсные магнетронные распылительные системы с электронно-вакуумными модуляторами", *Труды Украинского вакуумного общества*, Харьков, т. 3, с. 462 – 465, 1997.

Патенти

12. А. І. Кузьмичев, Ю. Г. Мельник, С. Б. Сидоренко, "Джерело для живлення підготовчого розряду магнетронної розпилювальної системи", Пат. України №40305 (UA) 7 C23C14/35, 16.07.2001.

Матеріали конференцій

13. I. V. Gusev, A. I. Kuzmichev, S. B. Sidorenko, "The structure and composition of the Al - O system condensates prepared by reactive ion plating", in *Conf. "Modification of Properties of Surface Layers of Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams"*, Sumy, 1993, p. 31.
14. Г. Н. Гордиенко, И. В. Гусев, А. И. Кузьмичев, С. Б. Сидоренко, А. И. Ямборко "Характеристики конденсатов алюминия, осажденных в среде активированной кислорода", на 3-й Харьковской вакуумной конф. совместно с семинаром-совещанием "Системы откачки ускорителей и термоядерных реакторов", Харьков, 1993, с. 13.
15. А. И. Кузьмичев, С. Б. Сидоренко, "Схемотехнический анализ системы для подачи импульсного напряжения на подложку при осаждении покрытий", на *Международ. науч.-техн. конф. "Проблемы физической и биомедицинской электроники"*, Киев, 1995, с. 112-114.
16. И. В. Гусев, А. И. Кузьмичев, С. Б. Сидоренко, "Характеристики покрытия из оксидированного алюминия, полученных реакционным ионным осаждением", на 6-й *Международ. симп. "Тонкие пленки в электронике"*, Херсон, 1995, т.1, с.46 – 49.
17. И. В. Гусев, А. И. Кузьмичев, В. И. Мельник, С. Б. Сидоренко "Электронно-ионные методы получения покрытий из оксидированного алюминия", *Proceeding First International Conference "New Leading-Edge Technologies in Mashine Building"*, Kharkov – Rybachie, 1995, p. 48.
18. A. I. Kuzmichov, S. B. Sidorenko, "The Use Of The Pulsed Treatment Regimes In Ion-Plasma Technology", *Book of Abstracts Second International Conference MPSL 96*, Sumy, 1996, p. 56.
19. А. И. Кузьмичев, С. Б. Сидоренко, О. Н. Бевза, "Магнетронные распылительные системы с импульсно-модулируемым питанием", *Proceeding First International Conference "New Leading-Edge Technologies in Mashine Building"*, Kharkov – Rybachie, 1996, p. 277.
20. С. Б. Сидоренко, М. В. Орел, "Схемотехническое моделирование каскадов лампово-полупроводникового модулятора для ионно-плазменных установок с помощью программы Pspice", *Сб. докл. Международ. научно-техн. конф. "Проблемы физической и биомедицинской электроники"*, Киев, 1996, с. 250 – 252.
21. A. I. Kuzmichev, O. N. Bevza, S. B. Sidorenko, "The magnetron sputtering system with pulse-modulated power supply", *Proc. Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology*, Minsk, v. 4, pp. 718 – 720, 1997.
22. А. И. Кузьмичев, В. Ю. Куликовский, С. Б. Сидоренко, "Динамические характеристики импульсной магнетронной распылительной системы." *IX - ая конф. по физике газового разряда*, тез. докл., ч. 2, Рязань, 1998, с. 23 - 26.

23. А. И. Кузьмичев, В. Ю. Куликовский, С. Б. Сидоренко, "Динамические характеристики импульсной магнетронной распылительной системы", *матер. конф. "Вакуумная наука и техника"*. Гурзуф. 1998, с. 174 - 178.
24. A. I. Kuzmichev, V. Yu. Kulikovsky, S. B. Sidorenko, "Pulsed gas discharge magnetrons for sputtering. Peculiarities of their operation", *14th ISPC, Prague*, 1999, v.2, p.729 – 734.
25. A. I. Kuzmichev, S. B. Sidorenko, L. Yu. Tsybulsky, V. Yu. Kulikovsky, "Pulsed discharges in magnetic field for thin film deposition", *12th Symp. on Application of Plasma Processes*, Slovakia, Liptovsky Jan, 1999, Proc., pp. 188 – 189.
26. A. I. Kuzmichev, Yu. I. Melnik, S. B. Sidorenko, V. Yu. Kulikovsky, "Pulsed regimes of energy input to the gas discharge and the substrate for control of plasma treatment processes", *4-th Czech-Russian Seminar on Project Contact No 101 (98) "Electrophysical and Thermophysical processes in Low-Temperature Plasma"*, Czech Rep., Brno, 2000, proc. pp. 126-128.
27. С. Б. Сидоренко, О. М. Бевза, Я. С. Сидоренко, "Дослідження чинників впливу на одержання розвинутої поверхні конденсату Al–O", *V наук. конф. "Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології (НАНСИС-2016)"*, м. Київ, 2016, с. 126.
28. О. М. Бевза, С. Б. Сидоренко, А. В. Мумладзе, "Осаждение двухкомпонентного состава, содержащего магнитный материал, при помощи магнетронной распылительной системы", *V наук. конф. "Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології (НАНСИС-2016)"*, м. Київ, 2016, с. 154.
29. С. Б. Сидоренко, О. М. Бевза, Я. С. Сидоренко, "Технологія отримання розвинутої поверхні у вакуумному реакційному середовищі", *Матер. конф. "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи"*, Київ, 2017, с. 247 – 249.

АНОТАЦІЯ

Сидоренко С.Б. "Імпульсний розряд в схрещених полях для отримання покриттів з розгалуженою поверхнею" – Рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.27.02 "Вакуумна, плазмова та квантова електроніка".

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена отриманню покриттів з розгалуженою поверхнею при використанні імпульсного розряду в схрещених електромагнітних полях. Розглянуто вплив імпульсного режиму термоіонного осадження на властивості покриттів.

Показано комплексний підхід до розробки технологічних імпульсних модулаторів, дослідження їх в складі системи генерації плазми та процесу транспортування речовини, а також дослідженні утворених покриттів.

Представлено спосіб отримання розвинутої поверхні на алюмінієвій фользі під час імпульсного іонно-плазмового осадження алюмінію в середовищі кисню. Визначено залежність морфології покриття з конденсату Al-O від відношення тиску кисню у вакуумній камері до швидкості осадження (P_{O_2}/V_k). Зазначено, що питома ємність покриття з конденсату Al-O, яка використовувалась як міра розгалуженості

поверхні, від P_{O_2}/V_k має екстремальний характер і сягає 150 мкФ/см^2 (при цьому для гладкої алюмінієвої фольги питома ємність $C_0 = 0,6 \text{ мкФ/см}^2$) для $P_{O_2}/V_k \sim 2,1 \cdot 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{хв/мкм}$.

Розглянуто розряд МРС, джерелом живлення якої є розроблений ТІМ. За допомогою діаграм показано та проаналізовано розвиток та існування імпульсного магнетронного розряду з підготовчим розрядом та без нього. Експериментально продемонстровано вплив імпульсного розряду на структуру покриття.

Представлені електричні схеми та їх моделі з моделями комутуючих елементів ТІМ.

Розробка імпульсних модуляторів, дослідження їх в складі систем імпульсної генерації плазми під час осадження, а також дослідження отриманих покриттів дозволяє оптимізувати схеми та режими роботи ТІМ і краще зрозуміти процеси, які відбуваються при переносі речовини на об'єкт напилення в технологічній камері та на поверхні створення покриття, це, в свою чергу, дає можливість керувати структурою покриття, що було продемонстровано в роботі.

Ключові слова: покриття з розгалуженою поверхнею, імпульсний розряд в схрещених полях, імпульсний модулятор, іонно-плазмове осадження, термоіонне осадження, імпульсне магнетронне розпилення, електронно-променеве випаровування, питома ємність конденсаторної фольги.

АНОТАЦІЯ

Сидоренко С.Б. "Импульсный разряд в скрещенных полях для получения покрытий с развитой поверхностью" – Рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.27.02 "Вакуумная, плазменная и квантовая электроника"

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского". Киев, 2021.

Диссертационная работа посвящена получению покрытий с развитой поверхностью при использовании импульсного разряда в скрещенных электромагнитных полях. Рассмотрено влияние импульсного режима термоионного осаждения на свойства покрытий.

Показано комплексный подход к разработке технологических импульсных модуляторов, исследовании их в составе системы генерации плазмы и процесса транспортировки вещества и исследовании полученных покрытий.

Представлены способ получения развитой поверхности на алюминиевой фольге при импульсного ионно-плазменного осаждения алюминия в среде кислорода. Определена зависимость морфологии покрытия из конденсата Al-O от отношения давления кислорода в вакуумной камере до скорости осаждения (P_{O_2}/V_k). Отмечено, что удельная емкость покрытия из конденсата Al-O, которая использовалась как мера разветвленности поверхности, от P_{O_2}/V_k имеет экстремальный характер и достигает 150 мкФ/см^2 (при этом для гладкой алюминиевой фольги удельная емкость $C_0 = 0,6 \text{ мкФ/см}^2$) для $P_{O_2}/V_k \sim 2,1 \cdot 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{хв/мкм}$.

Рассмотрены разряд МРС, источником питания которой является разработанный ТИМ. С помощью диаграмм показано и проанализировано развитие и существование импульсного магнетронного разряда с подготовительным разрядом и без него. Экспериментально продемонстрировано влияние импульсного разряда на структуру покрытия.

Представлены электрические схемы и их модели с моделями коммутирующих элементов ТИМ.

Разработка импульсных модуляторов, исследование их в составе систем импульсной генерации плазмы во время осаждения, а также исследования полученных покрытий позволяет оптимизировать схемы и режимы работы ТИМ и лучше понять процессы, которые происходят при переносе вещества на объект напыления в технологической камере и на поверхности создающегося покрытия, это, в свою очередь, дает возможность управлять структурой покрытия, что было продемонстрировано в работе.

Ключевые слова: покрытие с развитой поверхностью, импульсный разряд в скрещённых полях, импульсный модулятор, ионно-плазменное осаждение, термоионным осаждения, импульсное магнетронного распыления, электронно-лучевое испарение, удельная емкость конденсаторной фольги.

ABSTRACT

Sidorenko S.B. "Pulsed discharge in crossed fields for obtaining coatings with a voluminous surface" – Qualifying scientific work on the manuscript.

Ph.D. thesis on speciality for candidate's degree of technical science 05.27.02 "Vacuum, plasma and quantum electronics".

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021

The dissertation is devoted to obtaining coatings with a voluminous surface using a pulsed discharge in crossed electromagnetic fields. The influence of the pulsed regime of thermoionic deposition on the properties of coatings is considered.

The complex way to the development of technological pulse modulators (TPM), their study as part of a plasma generation system and the substance transport process, and the study of the received coatings are shown.

A method for obtaining a voluminous surface on an aluminum foil during pulsed ion-plasma deposition of aluminum in an oxygen environment is presented. The dependence of the morphology of the Al-O condensate coating from the ratio of oxygen pressure in the vacuum chamber to the deposition rate (P_{O_2}/V_c) was determined. It is noted that the specific capacitance of the Al-O condensate coating, which was used as a measure of the surface voluminousness, has an extreme character from P_{O_2}/V_c and reaches $150 \mu F/cm^2$ (while for smooth aluminum foil, the specific capacitance $C_0 = 0.6 \mu F/cm^2$) for $P_{O_2}/V_c \sim 2,1 \cdot 10^{-1} Pa \cdot min./\mu m$.

The discharge of the magnetron sputtering system, the power source of which is the designed TPM was considered. Using diagrams, the development and existence of a pulsed magnetron discharge with and without a preparatory discharge are shown and analyzed. The effect of a pulsed discharge on the coating structure has been experimentally demonstrated.

Electric circuits and their models with models of TPM switching elements are presented.

The development of pulse modulators, their study as part of systems for pulsed plasma generation during deposition, as well as the study of the obtained coatings, allows to optimize the schemes and operating modes of the TPM and to better understand the processes that occur when a substance is transferred to the deposition object in the technological chamber and on the surface of the coating being created, this, in turn, makes it possible to control the structure of the coating, which was demonstrated in the work.

Keywords: coating with voluminous surface, pulse discharge in crossed fields, pulse modulator, ion-assisted deposition, thermoionic deposition, pulsed magnetron sputtering, electron-beam evaporation, specific capacity of capacitor foil.